

Analyse statistique du mouvement des arcs dans une torche plasma triphasée à électrodes en graphite par camera rapide

Takali Sabri, Laurent Fulcheri, Frédéric Fabry, François Cauneau

MINES ParisTech, Centre PERSÉE
Procédés, Énergies renouvelables et Systèmes énergétiques
Rue Claude Daunesse, CS 10207, 06904 Sophia Antipolis ☐ France, Phone
+33.493.957.540. E-mail sabri.takali@mines-paristech.fr.

L'étude du mouvement des arcs électriques dans les torches plasmas haute température se limite souvent à des analyses cognitives qualitatives, ne permettant pas une caractérisation objective à l'échelle locale des arcs électriques ainsi que des phénomènes qui les influencent.

Afin de permettre une étude quantitative des principales caractéristiques de l'arc électrique (vitesse et direction du déplacement d'arc, point d'accroche sur la cathode, rayon de courbure et longueur de l'arc ☐), un algorithme de traitement et d'analyse d'images a été développé sur la base du logiciel Matlab®. Cet algorithme appliqué à une vidéo acquise par caméra haute vitesse permet de mieux appréhender le comportement de l'arc mais aussi d'effectuer une analyse statistique sur la vitesse et la direction du déplacement de l'arc ainsi que sur sa géométrie.

Introduction

La caractérisation du comportement des arcs se révèle d'une importance majeure sur le plan théorique exploratoire ainsi que pour l'optimisation de différentes applications industrielles. Plusieurs travaux ont été dédiés à l'étude des arcs électriques pour des torches plasma à courant continu, mais les travaux consacrés à l'étude des arcs électriques pour des torches à arcs triphasés sont moins nombreuses et se limitent à une analyse quantitative et cognitive. A travers ce travail, nous proposons une nouvelle méthodologie de caractérisation du comportement des arcs pour la torche à arc triphasés développé au laboratoire PERSÉE de Mines ParisTech via un algorithme de traitement et d'analyse de vidéo acquise par caméra rapide. Dans cette communication sont présentés en premier lieu les paramètres opératoires du banc d'essai ainsi que les conditions d'acquisition de la vidéo rapide. La deuxième partie est consacrée à la présentation de l'algorithme de traitement d'images et de détection des arcs. En dernière partie sont présentés les premiers résultats statistiques obtenus sur le mouvement des arcs.

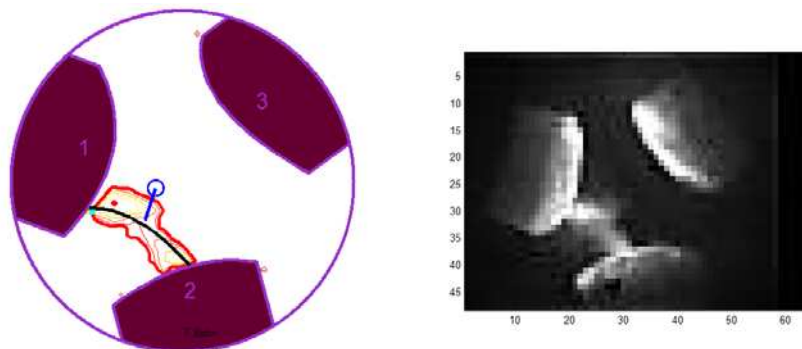


Figure 1. Images extraites de la vidéo prise par caméra rapide (droite) et de la vidéo traitée (gauche)

I. Banc d'essai et paramètres opératoires

La torche plasma caractérisée dans cette étude est dotée de 3 électrodes en graphite montées horizontalement sur un réacteur cylindrique avec une protection thermique en graphite. Le plasma étudié est un plasma d'azote qu'on injecte horizontalement aux niveaux des électrodes pour les protéger et verticalement à la zone inter-électrode pour conduire le plasma vers le bas. Le débit total d'azote est de $2,6 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. En ce qui concerne la source électrique, le courant triphasé d'alimentation est de 200 A, d'une puissance de l'ordre de 12~15 kW et d'une fréquence de 666 Hz.

La caméra utilisée pour l'acquisition de la vidéo est une Olympus FS avec une vitesse d'acquisition pouvant aller jusqu'à 1 million d'images par seconde pour une résolution de 24 X 8 pixels. Dans la vidéo étudiée, la vitesse d'acquisition est de 100 000 images par seconde avec une résolution de 64 X 48.

II. Algorithme de détection et d'analyse de mouvement des arcs

L'algorithme se divise en trois parties principales. La première partie permet de détecter la position des électrodes et de compléter les parties invisibles. La deuxième partie traite la vidéo image par image et permet de différencier un arc des électrodes, d'une simple zone chaude ou d'un résidu d'arc. Les éléments qui définissent la position, comme les pieds de l'arc, la ligne moyenne, la zone la plus chaude sont également extraits dans cette partie. La dernière phase de l'algorithme permet de traiter les informations obtenus précédemment afin d'effectuer des analyses statistiques sur la vitesse, la direction de déplacement, le rayon de courbure de l'arc et la durée de vie des arcs.

1. Détection des électrodes

Basé sur la différence de dissipation de chaleur, et par conséquent, de luminosité entre les électrodes et le plasma d'azote, l'algorithme permet de déduire, à partir de la moyenne des matrices de luminosité acquise sur une durée supérieure à une période du courant, la position et la géométrie des électrodes dans chaque image *i.e.* les agglomérations de cases de luminosités intenses représentent les surfaces chaudes des électrodes.

2. Détection des arcs

Pour reconnaître l'arc dans la matrice d'intensité lumineuse acquise par la caméra rapide, on lui accorde une définition simplifiée: c'est le volume dont la température est supérieure à celle du gaz qui l'entoure et celle des électrodes. On suppose l'existence d'une température spécifique T_s qui délimite le volume de l'arc. Cette température sera atteinte une fois l'arc établi et la jonction électrique réalisée entre l'anode et la cathode. L'équivalent de cette surface à température T_s sur la matrice de luminosité sera une iso-ligne avec une luminosité seuil I_s déterminée empiriquement. I_s correspond à une intensité lumineuse supérieure à celle des électrodes, mais suffisamment proche pour obtenir une distance minimale entre l'arc et l'électrode, permettant de détecter également les pieds d'arc. La détection de l'arc est réalisée sur chaque image de la vidéo.

Cet algorithme est codé sur la base du logiciel Matlab®. Il reçoit en entrée la vidéo acquise et envoie en sortie une deuxième vidéo traitée avec différents graphiques de distribution de densité de probabilité des paramètres qu'on juge pertinents pour caractériser le comportement des arcs de la torche triphasée.

III. Analyse statistique de différents critères du mouvement des arcs

1. Direction du vecteur vitesse instantanée

L'angle de la direction du vecteur vitesse instantanée est calculé par rapport à la droite qui relie les deux centres des électrodes jouant les rôles d'anode et de cathode. La Figure 1 montre que la distribution de la densité de probabilité possède une forme gaussienne sur l'intervalle $[40^\circ, 160^\circ]$ comprenant 80% de la probabilité. L'angle optimal est 95° ce qui montre que le centre de l'arc a tendance à se déplacer vers le centre de la zone inter-électrodes.

2. Vitesse moyenne des arcs

L'allure de la distribution gaussienne s'étale sur l'intervalle $[0, 40]$ m.s⁻¹ selon la Figure 2. Statistiquement, la vitesse moyenne majoritaire est de 15 m.s⁻¹. On note aussi que la distribution de densité de probabilité est quasi-symétrique par rapport à cette valeur moyenne. Cette vitesse rapportée aux conditions de température et de pression dans la zone inter-électrodes donne un nombre de mach de 0.012, montrant que le déplacement du centre de l'arc n'est pas influencé par l'onde de choc du claquage. L'obtention de la valeur de la vitesse de l'arc pourra nous permettre de calculer le coefficient de traînée et de déterminer ensuite la valeur de la force aérodynamique appliquée sur l'arc [1].

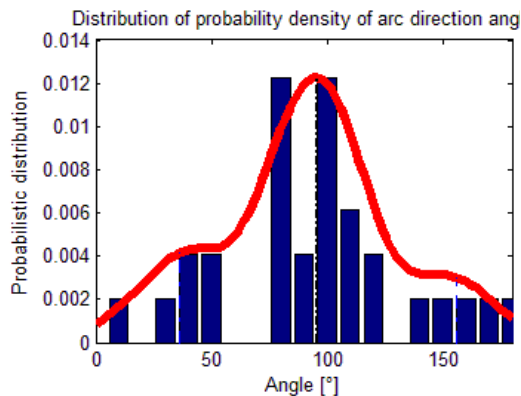


Figure 2. En rouge, courbe de la densité de probabilité de l'angle du vecteur vitesse instantanée du centre de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

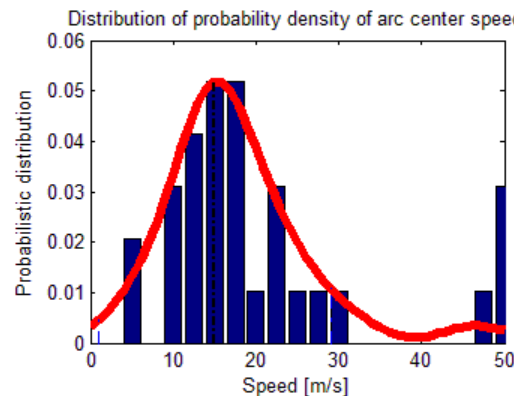


Figure 3. En rouge, courbe de la densité de probabilité de la vitesse moyenne du centre de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

3. Rayon de courbure de l'arc

Nous observons à partir de la nouvelle vidéo générée par le code que le rayon de l'arc est en évolution continue pendant la durée de vie de l'arc. Néanmoins, la distribution de la densité de probabilité du rayon de courbure minimal instantané de l'arc possède également une allure gaussienne avec un optimum à 8mm.

4. Durée de vie de l'arc

Sachant qu'une période est de l'ordre de 1,5 ms et que pendant une période, on a 6 arcs, la durée de vie théorique d'un arc est de 250 μ s. Selon la Figure 4, statistiquement la durée de vie moyenne d'un arc est de l'ordre de 190 μ s. Cette valeur est cohérente avec les observations faites sur les vidéos dans lesquelles les arcs ne sont pas continuellement présents. Pour qu'un arc soit détectable, il faut prendre en compte la phase d'amorçage et d'extinction de l'arc. De plus, la durée de vie d'un arc ne dépasse pas le double de la durée de vie théorique car au bout ce temps, le potentiel est le même sur les deux électrodes entre lesquelles l'arc s'est créé au début [2]. On remarque également que la pente est plus raide de côté gauche de l'optimum ce qui montre qu'il y a une durée de vie minimale de l'ordre de 80 μ s.

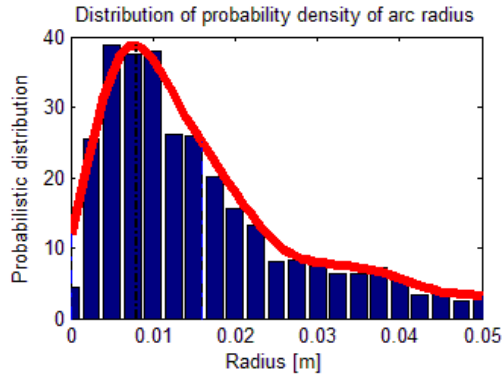


Figure 4. En rouge, la courbe de la densité de probabilité du rayon de courbure de la ligne moyenne de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

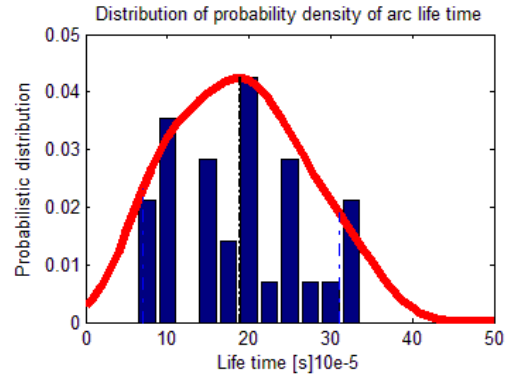


Figure 5. En rouge, courbe de la densité de probabilité de la durée de vie des arcs. En bleu, histogramme statistique.

Conclusion

L'analyse statistique du mouvement de l'arc nous a permis de décrire objectivement la direction et la vitesse du centre de l'arc, la durée de vie de l'arc et le rayon de courbure de la colonne d'arc. Grâce aux distributions de densité de probabilité obtenues, on a pu déterminer des valeurs approximatives de ces caractéristiques tout en ayant une estimation des erreurs sur chaque grandeur.

Plusieurs applications des résultats obtenus avec cet algorithme sont envisageables. A titre d'exemple, on peut valider l'approche théorique analytique proposée depuis quelques années [1] pour décrire le comportement des arcs dans une torche triphasée. La détermination des valeurs des forces électromagnétique et aérodynamique appliquées sur la colonne d'arc, représente une application directe de ces résultats.

Cet algorithme est actuellement appliqué au positionnement planaire des électrodes mais il est envisageable de l'adapter à d'autres configurations géométriques et ainsi, pouvoir obtenir une comparaison quantitative des caractéristiques de la décharge électrique triphasée en fonction de la géométrie de la torche. On comparera également les valeurs obtenues avec les résultats de la simulation MHD développée pour la même torche dans le laboratoire PERSÉE [2]. Cette comparaison sera un outil pertinent pour appréhender l'influence des différentes positions d'électrodes ou des conditions opératoires et faire évoluer la torche vers une configuration optimale.

Références

- [1] B. RAVARY, « Influence of the Electromagnetic Forces on Momentum and Heat Transfer in a 3-Phase ac Plasma Reactor », Plasma Chemistry and Plasma Processing, v19, No 1, (1999)
- [2] C. REHMET, « Christophe3D unsteady state MHD modeling of a 3-phase AC hot graphite electrodes plasma torch », Plasma Chemistry and Plasma Processing, (2013)